

引用格式:谢敬东,石全,关博文,等.考虑耦合影响的数智化电缆系统的系统动力学安全评估方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):101-112+173.

Citation: XIE Jingdong, SHI Quan, GUAN Bowen, et al. Dynamics safety evaluation method for digitally intelligent cable systems considering coupling effects[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 101-112+173.

# 考虑耦合影响的数智化电缆系统的 系统动力学安全评估方法

谢敬东<sup>1</sup>, 石全<sup>2</sup>, 关博文<sup>2</sup>, 李锐振<sup>1</sup>, 邓化宇<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学能源电力科创中心, 上海 200082; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:**近年来,数智化电缆线路系统中安装了不同类型的电气设备在线监测装置,但这些在线监测装置相对独立,采集到的运行数据未得到综合分析,难以起到综合防范安全事故的效果。为此,提出一套考虑耦合影响的数智化电缆系统动力学安全评估模型。首先,选取数智化电缆线路系统的电气和非电气关键特征参量并进行分类;其次,建立安全评估因果关系图,设计模型功能,分析并搭建电缆系统动力学流程图;再次,应用相互作用矩阵确定变量权重和建立最优模型训练参数,分别构建不同类型变量与设备之间故障概率函数;然后,依据串联模型实现对整个电缆系统的安全评估,并将其转化为系统动力学方程,搭建数智化电缆系统安全评估模型;最后,以某地区电缆线路为例评估其安全状态。结果表明,本模型处理复杂电缆系统时考虑了多变量之间的耦合影响,能够实现对数智化电缆的全面评估,有效保证其运行安全。

**关键词:**数智化电缆;因果关系图;系统动力学流程图;相互作用矩阵;系统动力学安全评估

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.011 中图分类号: TM726.4 文章编号: 1673-9140(2024)06-0101-12

## Dynamics safety evaluation method for digitally intelligent cable systems considering coupling effects

XIE Jingdong<sup>1</sup>, SHI Quan<sup>2</sup>, GUAN Bowen<sup>2</sup>, LI Ruizhen<sup>1</sup>, DENG Huayu<sup>1</sup>

(1. Science Innovation Center of Energy and Electric Power, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China;

2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In recent years, various types of online monitoring devices have been installed in the digitally intelligent cable line system for electrical equipment. However, these online monitoring devices are relatively independent, and the monitored operation data is not comprehensively analyzed. As a result, it becomes challenging to effectively prevent safety accidents. To address this issue, a dynamics safety evaluation model for digitally intelligent cable systems considering coupling effects is proposed. Firstly, the electrical and non-electrical key characteristic parameters of the digitally intelligent cable line system are selected and classified. Secondly, a causality diagram that can be used for safety evaluation is established, and model functions are designed to analyze and build a dynamics flow diagram for the cable system. To determine the variable weights, an interaction matrix is employed, allowing for the establishment of optimal model training parameters. Failure probability functions are constructed for different types of variables and devices. Additionally, the safety evaluation of the entire cable system is achieved through a tandem model, which is transformed into a system dynamics equation to create a safety evaluation model for the digitally intelligent cable system. Finally, the safety state of a regional cable line is evaluated. The results demonstrate that this model effectively handles complex cable systems by considering the coupling effects between multiple variables. It enables a

收稿日期: 2023-05-18; 修回日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51507099)

通信作者: 谢敬东(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力市场建设及其监管、智能微电网和配电网安全分析等研究; E-mail: xie\_jd@shiep.edu.cn

comprehensive safety evaluation of digitally intelligent cables and ensures their reliable operation.

**Key words:** digitally intelligent cable; causality diagram; system dynamics flow diagram; interaction matrix; system dynamics safety evaluation

电缆系统故障会对电网的安全运行和经济效益产生严重影响<sup>[1-4]</sup>。为推进数智化发展,110 kV及以上高压电缆已普遍安装电缆温度、水位、湿度、局部放电等在线监测装置<sup>[5-7]</sup>,使电缆线路安全运维上升到新的高度。监测数据呈逐渐增多的趋势,但未能得到科学合理分析与应用。与此同时,非电气变量的影响不容小觑。2021年12月,上海通北变电站水管爆裂,导致设备故障跳闸,继而引发区域性停电;某市隧道温度过高且通风不好,高压电缆头异常发热,使密封胶外流,导致线路发生故障<sup>[8]</sup>。事故的发生归咎于采集到的运行环境实时数据未能引起电力企业电缆运维的重视,使得大量数据未能得到充分分析,运维与调度信息不共享,错过了最佳抢修故障<sup>[9]</sup>和调整运行方式的时间节点。因此,如何对电缆线路进行安全评估是电缆运维管理和保证电网安全运行的关键问题。

目前,已有诸多数据分析方法被应用到设备评估,如马尔科夫<sup>[10]</sup>、故障树<sup>[11]</sup>、贝叶斯网络法<sup>[12]</sup>、神经网络法<sup>[13-14]</sup>、D-S证据理论<sup>[15-16]</sup>和数据科学<sup>[17]</sup>等,且已有多种方法在电力变压器<sup>[18-19]</sup>、智能变电站二次设备<sup>[20]</sup>和风电机组<sup>[21]</sup>等处验证了可行性,但存在数据要求高,关键属性缺失时,其正确率比较低的问题。

相对于以上评价方法,综合评价法<sup>[22-23]</sup>不需要过多地依赖试验数据。文献[24]划分电缆不同组件,基于多级模糊算法,实现风险评判,但未考虑设备、变量之间耦合,未能将电缆线路不同组件的差异化评估与实时状态评估融合在一起,达不到时效性与经济性两者兼具。文献[25]针对电缆线路评估过程难以量化、关系参量模糊等问题,提出应用模糊灰色综合评判理论并取得可观的效果,但该方法局限于简单线路,随着线路复杂性不断提高,该方法便失去了相应的优势和评估效果。也有学者引入健康指数,如文献[26]定量设备的综合运行状态,将设备状态与时间进行关联,实现了设备状态合理预测,但存在实时性不足的问题。文献[27]提出通过环境因素对设备故障概率模型进行修正,准确反映不同个体之间的差异化状态,但只借助经验取其恶劣度,未能充分利用环境实时数据。除上述不足外,目前研究方法较为片面,局限于电缆自身

状态评估,未能拓展到运行安全领域进行分析,存在数据孤立问题,未能综合分析数据,无法系统化评估整个电缆的运行安全。

系统动力学作为一种数学工具,能够分析内部因素之间的相互作用,处理复杂系统中的问题<sup>[28]</sup>,具备模糊综合评价的优势,可实现定性与定量指标的综合分析<sup>[29]</sup>,且能弥补其不能实现指标与评估对象之间的连续量化和指标之间互相独立存在的缺点。

当前,通过系统动力学方法实现电缆线路运行安全评估的研究并不多见。为此,本文将电缆线路看作一个由电气和非电气设备构成的实时动态平衡的复杂系统,对系统动力学进行改进,进行数据的实时输入,综合考虑电气变量与非电气变量两方面监测信息,搭建系统动力学模型,解决现阶段研究中存在的不足,实现电缆线路系统的全息化安全分析,有力保证电缆线路的安全运行。

## 1 数智化电缆系统特征提取

电缆线路分层结构示意图如图1所示,电缆线路被视为一个系统,其中包含电缆本体、电缆终端和电缆中间接头3种设备,每种设备由相对应的关键特征变量进行描述。电缆设备的监测对象和安全特征描述如表1所示。

表1 电缆设备的监测对象和安全特征描述

Table 1 Description of monitoring objects and safety features of cable devices

| 类型    | 子类型    | 主要监测信号 | 安全特征描述                     | 采用的评估方法   |
|-------|--------|--------|----------------------------|-----------|
| 电气变量  | 电气信号   | 负荷电流   | 单一指标,该值处于阈值以内,表明电缆设备为安全状态  | 规程设计导则    |
|       |        | 开关信号   | 0-1状态                      |           |
|       |        | 环流     |                            |           |
| 非电气变量 | 设备状态参数 | 局部放电   | 极小型指标,该值越小表明电缆本体安全性越高      | 健康指数经验公式  |
|       |        | 设备温度   |                            |           |
|       | 运行环境参数 | 水位     | 极小型指标,该值越小表明电缆设备安全性越高      | 单参数指数函数模型 |
|       |        | 湿度     |                            |           |
|       |        | 温度     | 中间最优型指标,该值趋于中间值表明电缆设备安全性越高 |           |

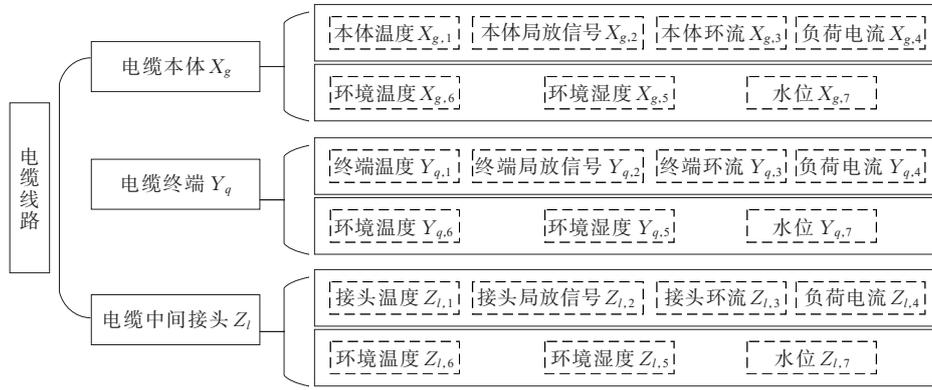


图 1 电缆线路分层结构示意图

Figure 1 Layered structure of cable lines

## 2 考虑耦合影响的数智化电缆系统的系统动力学安全评估模型

### 2.1 电缆线路系统动力学因果关系图

根据数智化电缆运行安全评估关键指标,设计电缆线路实现安全运行的因果关系,如图 2 所示。整个电缆线路系统的安全状况受到其内部设备安全水平的影响;而设备安全状态受到其关键特征变量和其他设备安全状态共同影响;关键特征变量主要由局放信号、环流和运行温度等内部因素与温度、水位等外部因素共同组成。这些

因素之间相互反馈构成电缆运行安全的因果关系图。其中,水位、环境湿度、局放信号、环流和温度越小,设备安全状态越好,在系统动力学中属于负反馈关系,用“-”表示;环境温度和负荷电流属于中间最优型指标,当处于最优值以下时,与设备之间属于正反馈关系,反之属于负反馈关系;邻近设备状态在安全状态差的情况下,存在耦合效应,故两者属于同向正反馈关系,用“+”表示;设备状况越优,整个电缆线路系统的运行状况也越安全,故两者属于正反馈影响关系,用“+”表示。

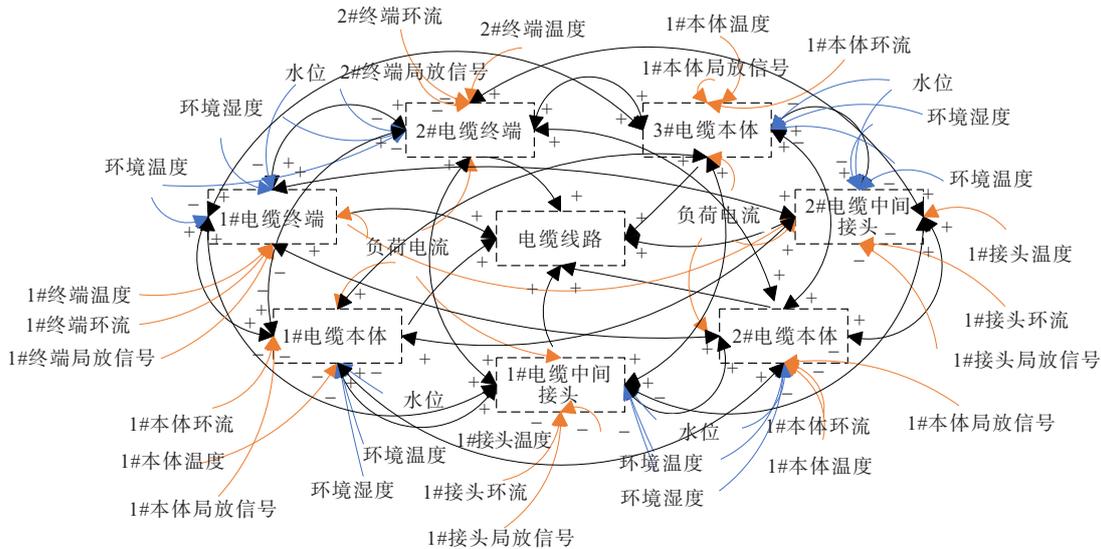


图 2 电缆线路实现安全运行的因果关系示意图

Figure 2 Causality diagram of cable lines for safe operation

### 2.2 电缆线路系统动力学流程图构建

本文建立三大功能结构关系层,分别为监测数据层、设备层和系统层,该模型具有 3 层安全评估预警功能,其评估流程如图 3 所示。

首先,由系统层对电缆整体运行安全进行异常

的判断,然后再通过设备层的安全评估实现对异常信息的异常类型判别和准确定位,最后通过监测信号的异常行为对故障进行识别。综上,通过搭建系统动力学流程图,建立特征变量-设备-系统三者关系,如图 4 所示。

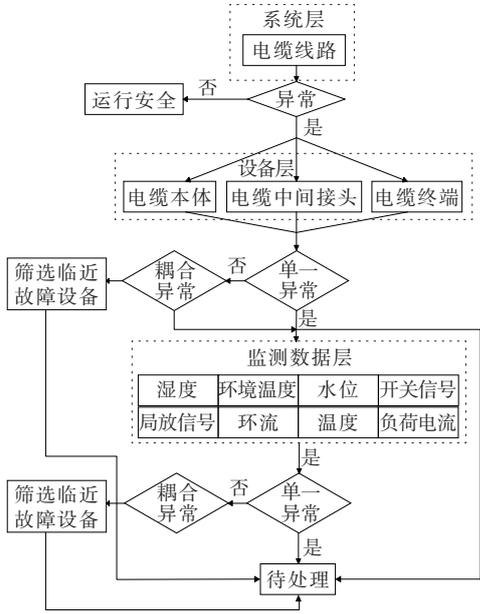


图3 评估流程  
Figure 3 Evaluation flow

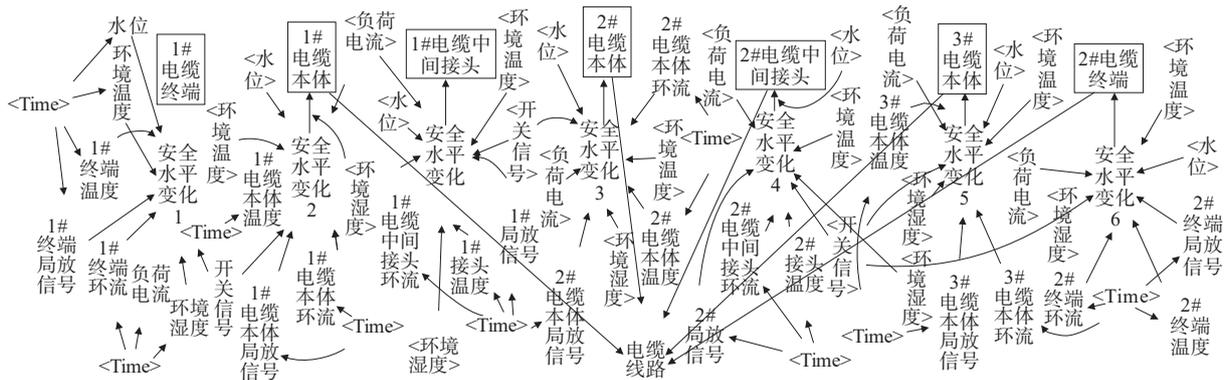


图5 电缆线路系统动力学流图

Figure 5 Dynamics flow diagram of cable system

2.3 不同类型变量故障概率函数构建

2.3.1 电气信号故障概率函数

电缆负荷电流超过一定限值会引起导体以及附件温度升高,严重时会导致导体烧毁。故该特征变量应严格控制在最大允许负荷电流数值以下,如下:

$$p_1(t) = \begin{cases} 0, & b^s(t) \leq b^s \\ 1, & b^s(t) > b^s \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $p_1(t)$  为设备  $s$  运行在  $t$  时间的负荷电流的故障概率;  $b^s(t)$  为设备  $s$  在  $t$  时刻的负荷电流值;  $b^s$  为设备  $s$  中负荷电流运行的极限值。

开关信号由电网实时输入, 1 为通, 0 为断:

$$p_2(t) = \begin{cases} 1, & a(t) = 0 \\ 0, & a(t) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

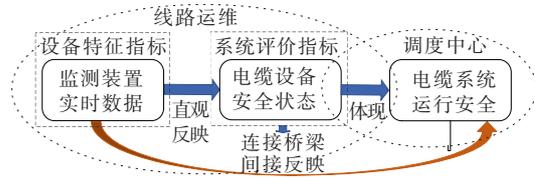


图4 特征变量-设备-系统关系

Figure 4 Feature variable-device-system relationship

通过3层评估实现故障快速判断、快速定位和快速识别。通过层与层之间的反馈联系,分析并搭建出电缆线路系统动力学流图,如图5所示。由设备特征指标-监测数据反映电缆设备安全状态,系统评价指标-设备体现电缆系统的运行安全状况;以电缆设备作为连接桥梁,建立由监测数据与电缆系统的间接关系,使得电缆线路系统中采集到的在线监测数据得到综合分析,解决了在线监测装置孤岛的问题,实现了区域与中心信息共享。

式中,  $p_2(t)$  为在  $t$  时间的开关信号的故障概率;  $a(t)$  为在  $t$  时间的信号值。

故电气信号故障概率函数为 2 种乘积:

$$p(t) = 1 - (1 - p_1(t))(1 - p_2(t)) \quad (3)$$

2.3.2 基于设备状态参数的故障概率函数

健康指数是设备健康状态的定量转化,同时也是联系设备故障概率的重要媒介。本文引入设备健康指数  $H$ , 范围取为  $[0, 1]$ 。通过设备状态参数与正常值的偏差程度建立健康指数,如下:

$$H_i^s(t) = \begin{cases} \frac{x_i^s - x_i^s(t)}{x_i^s}, & x_i^s(t) \leq x_i^s \\ 0, & x_i^s(t) > x_i^s \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $H_i^s(t)$  为设备  $s$  的第  $i$  个参数在  $t$  时刻的健康指数;  $x_i^s$  为设备  $s$  第  $i$  个参数的极限值;  $x_i^s(t)$  设备  $s$  第  $i$

个参数在  $t$  时刻的数值。

目前,权重确定方法忽略了多变量耦合的影响,故本文采用相互作用矩阵确定权重并解决此类问题,并依据权重求和的方法由特征参数健康指数值建立出设备运行健康参数,最后考虑老化因素,得出设备的综合健康指数。相互作用矩阵与其他评价方法相比具有很大优势,能够计算多个变量对目标产生影响时变量之间的交互作用。相互作用矩阵原理如图 6 所示。

|                                |          |          |     |                                |
|--------------------------------|----------|----------|-----|--------------------------------|
| $A_1$                          | $J_{12}$ | $J_{13}$ | ... | 第 $j$ 列: $A_j$ 对主对角线上其他各主因素的影响 |
| $J_{21}$                       | $A_2$    | $J_{23}$ | ... |                                |
| $J_{31}$                       | $J_{32}$ | $A_3$    | ... |                                |
| ...                            | ...      | ...      | ... |                                |
| 第 $i$ 行: $A_i$ 对主对角线上其他各主因素的影响 |          |          | ... | $A_m$                          |

图 6 相互作用矩阵原理示意图

Figure 6 Principle of interaction matrix

各元素因素权重确定方法如下:

$$B_i = \frac{D_i + E_i}{2 \sum_{j=1}^m J_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^m J_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^m J_{ji}, i, j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式(5)~(7)中,  $B_i$  为第  $i$  个影响因素权重;  $D_i$ 、 $E_i$  分别为第  $i$  个因素对其他因素的影响和被影响程度总和;  $J_{ij}$  为因素  $X_i$  对因素  $X_j$  的作用对系统产生的影响;  $J_{ji}$  为因素  $X_j$  对因素  $X_i$  的作用对系统产生的影响。

设备运行健康指数如下:

$$H'_r(t) = \sum_{i=1}^m B_i H_i^s(t), i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

式中,  $H'_r(t)$  为  $t$  时刻的设备运行健康指数。

设备的实际性能会随着时间的推移不断衰退,故在不同运行年限下,设备的综合健康状态存在差异,设备老化过程按时间尺度是服从指数分布<sup>[30-31]</sup>,设备的老化健康指数如下:

$$H_a(t) = 1 - (1 - H_0) e^{-\frac{\ln(1-H_0) - \ln(1-H_t)}{T}(t-t_0)} \quad (9)$$

式中,  $H_a(t)$  为在时间  $t$  的老化健康指数;  $H_0$  为在  $t_0$  时初始老化健康指数;  $t_0$  为设备初始的投运时间;  $t$  为设备被评估的时间;  $H_t$  为设备退役时的健康指数;  $T$  为设备的平均寿命。

考虑设备在役时间,定义修正因子如下:

$$\varphi(t) = \frac{H_a(t)}{H_0} \quad (10)$$

最终,设备的健康指数为

$$H'(t) = \varphi(t) H'_r(t) \quad (11)$$

式中,  $H'(t)$  在  $t$  时间的设备健康指数;  $\varphi(t)$  为健康因子。

设备健康指数与设备故障率<sup>[32]</sup>的关系式为

$$l(t) = K e^{-100CH'(t)} \quad (12)$$

式中,  $l(t)$  为在  $t$  时间的设备故障率;  $K$ 、 $C$  为比例系数。

依据文献[33-34]可知,常用故障率  $l_{const}$  对应电缆设备健康指数 0.8、最小故障率  $l_{min}$  对应电缆设备健康指数 1;通过历史数据获取电缆线路系统中各设备的平均故障率,最小故障率取平均故障率的 10%~20%<sup>[35]</sup>,依据式(12),可分别求得设备相关的比例系数  $K$  和曲率系数  $C$ ,得到健康指数与设备故障率的关系式。建立故障率与故障概率关系<sup>[36-37]</sup>,如下:

$$p_i(t) = 1 - e^{-l(t)} \quad (13)$$

式中,  $p_i(t)$  为  $t$  时间设备故障概率。

### 2.3.3 基于运行环境参数的故障概率函数

指数模型仅含单一未知参数,模型复杂度低且计算方便,并在实际验证中取得了可观效果<sup>[38]</sup>;本文对指数模型进行改进优化,引进如下分段函数以合理描述设备与环境之间的故障率:

$$\lambda_j(t) = \begin{cases} 0, & 0 < y(t) \leq y_{min} \\ e^{M(y(t)-y_{max})}, & y_{min} < y(t) \leq y_{max} \\ 1, & y(t) > y_{max} \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\lambda_j(t)$  为第  $j$  个环境影响因素在  $t$  时刻对设备所造成的设备故障率;  $y_{min}$  为电缆设备受影响的起始值;  $y_{max}$  为设备正常运行的最大值;  $M$  为模型待定系数。

建立故障率与故障概率之间的关系<sup>[39]</sup>,最终得到外部环境对电缆设备产生的故障概率为

$$p_j(t) = 1 - e^{-\frac{\lambda_j(t)}{1-\lambda_j(t)}} \quad (15)$$

式中,  $p_j(t)$  为第  $j$  个环境影响因素在  $t$  时刻对设备所造成的设备故障概率。

由式(14)、(15)可知,函数关系的构建关键在于参数  $M$  的取值。对于该参数的训练方法,可将历史数据与专家经验相结合并进行综合分析,建立最优模型,求解非线性方程以获得最优参数  $M$ 。最优  $M$  值求解流程如图 7 所示。对于不同的环境变量数

值  $h$  所对应的设备失电概率可表示如下:

$$p_{\text{fault}}^{(h)} = \frac{N_{\text{fault}}^{(h)}}{N_{\text{total}}^{(h)}} \quad (16)$$

式中,  $N_{\text{fault}}^{(h)}$  是变量在该数值区域内设备失电数目, 不论任何原因失电, 若环境变量数值  $h$  处于安全值以外, 都将该设备计入在内;  $N_{\text{total}}^{(h)}$  表示该数值区域内设备总数。

不同环境变量数值  $h$  所对应的设备失电概率如下:

$$u_{\text{fault}}^{-(h)} = \frac{\sum_{k=1}^n u_k^{(h)}}{n} \quad (17)$$

式中,  $u_k^{(h)}$  为变量在该数值下第  $k$  个专家评价概率值。

定义单个设备发生故障概率的拟合指标如下:

$$F_{\text{appro}} = \omega_1 \sum_{i=1}^n (p_{\text{fault}}^{(h)} - p_j^{(h)})^2 + \omega_2 \sum_{i=1}^n (u_{\text{fault}}^{-(h)} - p_j^{(h)})^2 \quad (18)$$

式中,  $\omega_1$  为历史数据故障概率权重值;  $\omega_2$  为专家经验权重值;  $p_j^{(h)}$  为第  $j$  个环境影响因素的数值  $h$  对设备造成的故障概率。

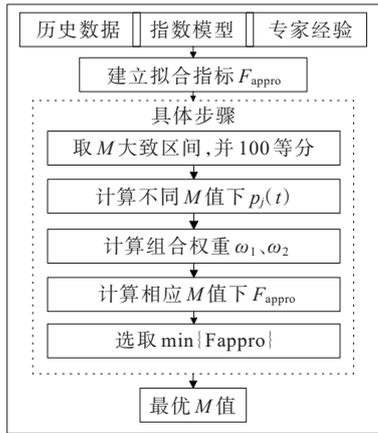


图7 最优  $M$  值求解流程

Figure 7 Solution flow of optimal parameter  $M$

$F_{\text{appro}}$  指标越小, 代表拟合曲线效果越好。为了更加合理地处理历史数据中样本数量的问题, 采用熵权法和序关系法<sup>[40]</sup>组合分配权重, 达到主客观统一, 具体方法此处不再赘述。

以 8:2 的比例将数据集拆分为训练集与测试集, 并建立误差指标均方误差 (mean square error, MSE) 评估模型参数的准确性:

$$e_{\text{MSE}} = \frac{1}{m_c} \sum_{r=1}^n (o_r - \hat{o}_r)^2 \quad (19)$$

式中,  $o_r$  为样本数据值;  $\hat{o}_r$  为模型数据预测值;  $m_c$  为

测试集数量。

随着故障数据和专家经验数据不断增加, 权重值更新, 参数  $M$  最优值趋于真实值。

## 2.4 电缆设备和系统故障概率函数构建

单个因素的异常难以引发事故, 但多因素协同作用可能会造成较大的安全隐患。本文采用韦恩图阐述安全评估的思路, 多因素耦合示意图如图 8 所示, 考虑电气信号、设备状态参数和运行环境参数 3 类数据。然而, 这些因素之间并不是孤立存在, 而是相互耦合的。经过实验分析, 监测变量的任何一个异常都需要引起关注。为此, 本文选择串联模型进行安全评估, 建立第  $g$  个电缆本体的评估方法。

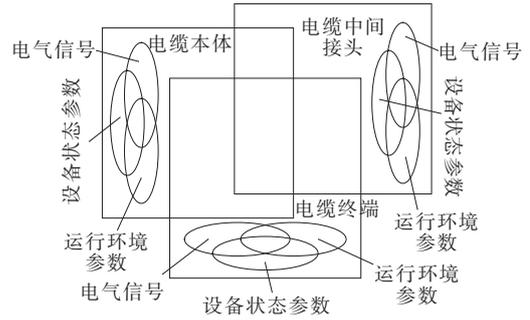


图8 多因素耦合示意图

Figure 8 Multi-factor coupling

$$X_g(t) = 1 -$$

$$\prod_{j=1}^3 (1 - p_{g,i}(t))(1 - p_{l,g}(t))(1 - p_{f,g}(t)) \quad (20)$$

同理, 对于第  $l$  个电缆接头:

$$Z_l(t) = 1 -$$

$$\prod_{j=1}^3 (1 - p_{l,j}(t))(1 - p_{l,i}(t))(1 - p_{f,l}(t)) \quad (21)$$

第  $q$  个电缆终端:

$$Y_q(t) = 1 -$$

$$\prod_{j=1}^3 (1 - p_{q,j}(t))(1 - p_{l,q}(t))(1 - p_{f,q}(t)) \quad (22)$$

式中,  $Z_l(t)$ 、 $X_g(t)$ 、 $Y_q(t)$  分别为第  $l$  个电缆接头、第  $g$  个电缆本体、第  $q$  个电缆终端在  $t$  时刻的故障概率值;  $p_{l,i}(t)$ 、 $p_{g,i}(t)$ 、 $p_{q,i}(t)$  分别为第  $l$  个电缆接头、第  $g$  个电缆本体、第  $q$  个电缆终端中第  $j$  个环境影响因素在  $t$  时刻对设备所造成的设备故障概率;  $p_{l,i}(t)$ 、 $p_{l,g}(t)$ 、 $p_{l,q}(t)$  为第  $l$  个电缆接头、第  $g$  个电缆本体、第  $q$  个电缆终端中设备状态参数在  $t$  时刻对设备所造成的设备故障概率;  $p_{f,l}(t)$ 、 $p_{f,g}(t)$ 、 $p_{f,q}(t)$  分别为第  $l$  个电缆接头、第  $g$  个电缆本体、第  $q$  个电缆终端中电气信号

在  $t$  时刻对设备所造成的设备故障概率。

电缆线路属于多设备串联系统,若该串联系统有一个设备出现故障状态,即设备的故障概率为 1,则电缆整个系统便处于故障状态,即  $P=1$ 。这样该系统能综合考虑多设备故障的耦合影响<sup>[41]</sup>,依据串联系统可靠性公式建立电缆线路系统故障概率表达式为

$$P(t) = 1 -$$

$$\prod_{g=1}^x (1 - X_g(t)) \prod_{q=1}^y (1 - Y_q(t)) \prod_{l=1}^z (1 - Z_l(t)) \quad (23)$$

式中,  $P(t)$  为电缆线路系统的故障概率。

### 3 数智化电缆系统的系统动力学安全评估方法

将上述故障概率函数转化为系统动力学方程,

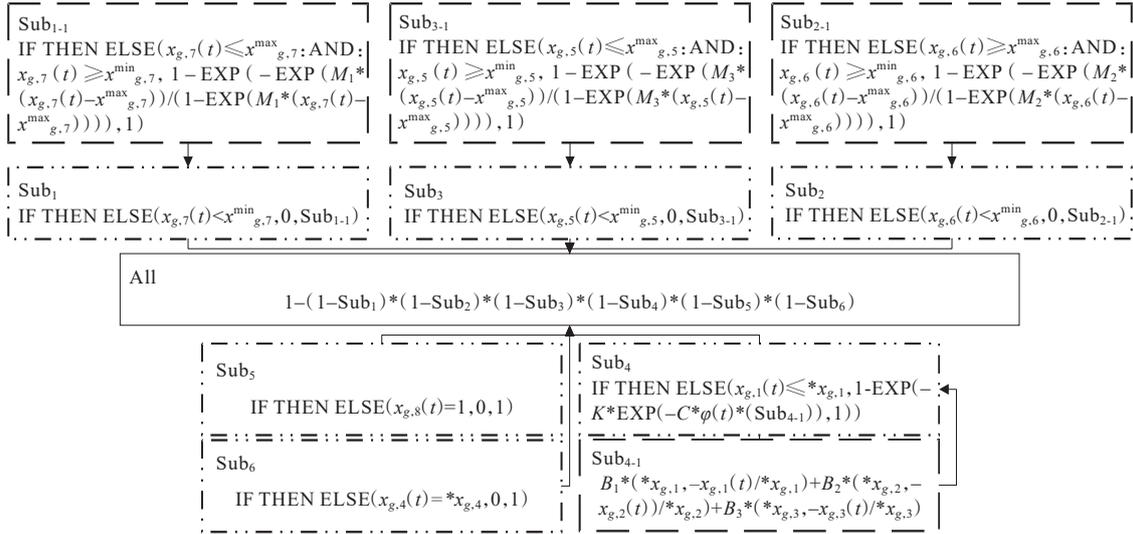


图 9 系统动力学安全评估方程构建流程

Figure 9 Construction process of system dynamics safety evaluation equation

## 4 算例分析

### 4.1 参数确定

本文选择某公司的一条 220 kV 电缆线路,该线路有 6 段,12 个电缆中间接头和 3 个电缆终端;不考虑该线路设备之间的投入时间差异,假设同一时间投入运行,数据采集时间为 2022 年 10 月 8 日,电缆的寿命为 30~40 a<sup>[42]</sup>,故文中线路平均寿命取 35 a,代入式(9)、(10)得到设备修正因子  $\varphi(t)=0.883$ ;电缆本体、电缆中间接头和电缆终端故障率比<sup>[9]</sup>为 1:4.29:2.57,电缆平均故障率<sup>[38]</sup>为 0.029,故可求得各电缆设备平均故障率,并依据式(12)求得参数值。设备监测数据故障函数参数值如表 2

以 1# 电缆本体为例,由于方程太过复杂,采用流程形式进行展示,方程构建流程如图 9 所示。其中,  $x_{g,1}(t) \sim x_{g,7}(t)$  表示第  $g$  个电缆本体的监测信号,如图 1 所示;  $x_{g,5}^{\max} \sim x_{g,7}^{\max}$ ,  $x_{g,5}^{\min} \sim x_{g,7}^{\min}$  表示受环境温度影响的正常运行的最大值和受水位影响起始值;  $*x_{g,1} \sim *x_{g,4}$  表示电缆本体在相应参数下运行的极限值;  $\varphi(t)$  为健康因子;  $M, C$  为模型待定系数。实线区域是总的方程结构,由点划线区域中方程填入其相应位置,虚线区域是点划线区域子区域,将方程填入点划线相应位置。最终形成完整的系统动力学方程。

电缆线路系统方程构建如下:

$$1 - (1 - Z_1(t))(1 - X_1(t))(1 - X_3(t)) (1 - Y_2(t))(1 - Z_2(t))(1 - X_2(t)) (1 - Y_1(t)) \quad (24)$$

所示。依据上述相互作用矩阵,采用专家半定量取值法进行矩阵元素赋值,最终求得设备状态参数的权重值如表 3 所示,采用本文所述方法,确定权重,如表 4 所示。

表 2 设备监测数据故障函数参数值

Table 2 Failure function parameter values of monitoring data of devices

| 设备     | 平均故障率<br>$\lambda_{\text{const}}$ | 最小故障率<br>$\lambda_{\text{min}}$ | $K$    | $C$      |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------|--------|----------|
| 电缆本体   | 0.011 07                          | 0.002 2                         | 7.097  | 0.080 79 |
| 电缆中间接头 | 0.047 50                          | 0.009 5                         | 29.690 | 0.080 47 |
| 电缆终端   | 0.028 45                          | 0.005 7                         | 17.660 | 0.080 38 |

表3 权重值B

Table 3 Weight value B

| 参数   | 权重B  |
|------|------|
| 环流   | 0.35 |
| 局放信号 | 0.25 |
| 设备温度 | 0.4  |

表4 权重值 $\omega_1, \omega_2$

Table 4 Weight values  $\omega_1$  and  $\omega_2$

| 参数 | 历史数据权重 $\omega_1$ | 专家经验权重 $\omega_2$ |
|----|-------------------|-------------------|
| 水位 | 0.377 4           | 0.622 6           |
| 湿度 | 0.224 3           | 0.775 7           |
| 温度 | 0.286 7           | 0.713 3           |

由表4观察可知,专家经验权重要大于历史数据权重,原因是历史数据样本容量较小,由专家经验确定的经验样本所占比重较大,随着历史客观数据不断累积,通过模型训练,权重 $\omega_1$ 会越来越大,权重分配也会随之更新。

考虑故障数据样本小因素,由于线路大部分处于同一水平面,为了简化分析,所有设备所受环境

因素影响一致,即函数参数相同。依据本文所述优化模型,训练得到运行环境故障概率函数参数,确定参数M取值,并计算MSE验证模型准确性。运行环境故障函数参数值如表5所示。

确定参数后,将函数转化为系统动力学方程,如图10所示,输入系统的具体函数示例。为避免运行环境突发事件的发生,并实时监测设备故障概率情况,运行环境采样周期设为1h,局放信号、环流和运行温度采样周期为1min;通过采集到的数据,利用系统动力学全息化模型对电缆线路进行安全评估。少量设备中未安装在线监测装置,部分数据未获取,可采用历史数据平均值进行代替。

表5 运行环境故障函数参数值

Table 5 Parameter values of failure function in operating environment

| 参数 | M     | MSE      |
|----|-------|----------|
| 水位 | 0.43  | 0.000 19 |
| 湿度 | 32.62 | 0.004 60 |
| 温度 | 1.67  | 0.006 20 |

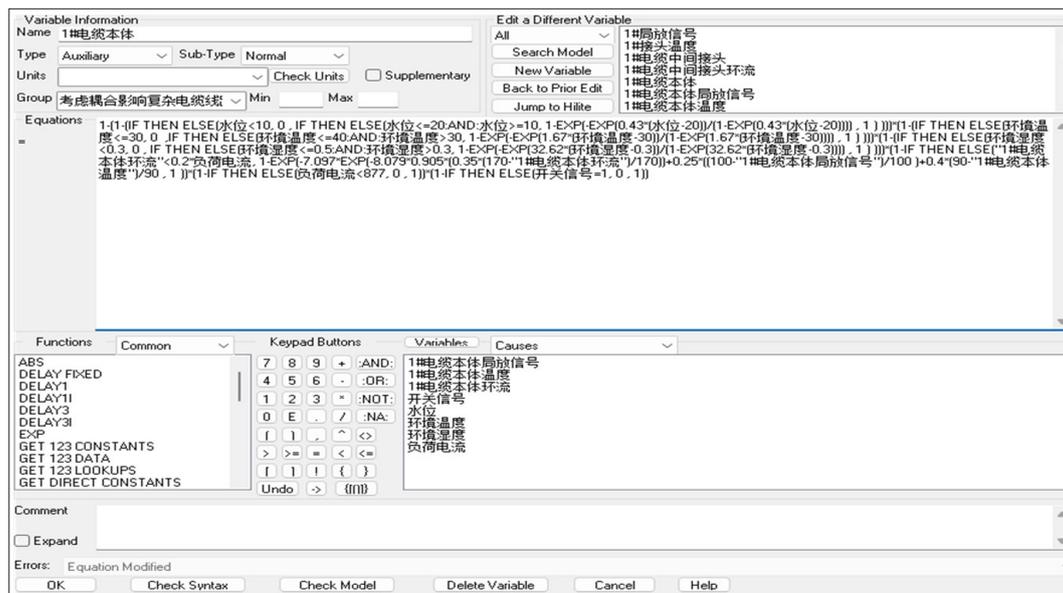


图10 电缆线路系统动力学方程展示示意图

Figure 10 Demonstration of dynamics equation of cable line system

### 4.2 单变量异常分析

由于采样数据中未出现水位异常情况,故采用历史异常数据验证模型的有效性。依据实际考察情况,模型设置正常运行最大值即水位安全值为20cm,水位影响起始值取其安全值的一半为10cm;数据导入模型,运行仿真得出水位对电缆系统故障

概率如表6所示。结果显示,由于电缆线路系统中含有众多设备,且温度、湿度无异常,故系统故障概率处于0.3以下,则认为系统处于安全运行状态。

首先,依据建立好的水位与整个电缆系统的影响关系,可通过水位变化关系实现整个系统故障演变趋势分析,判断电缆线路系统是否发生故障:在

02:00—10:00时,电缆系统故障概率随着水位上升而不断增大,此时应引起电网企业员工注意,以免发生突发事件,造成严重后果。12:00时水位超过安全值,系统故障概率为1,此时应及时进行排水处理,以免影响电缆线路的安全运行,避免出现严重的停电故障;13:00之后系统故障概率走势下降,说明系统处于安全运行状态,无须过多关注此类情况。

其次,依据设备受水位的影响变化,可实现快速定位故障的效果。

表 6 水位对电缆系统故障概率

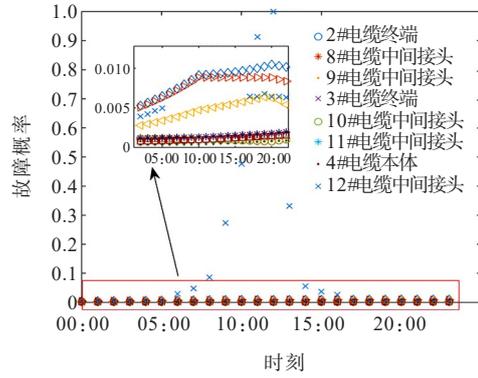
Table 6 Effect of water level on failure probability of cable system

| 时刻    | 水位   | 概率       | 时刻    | 水位   | 概率       | 时刻    | 水位   | 概率       |
|-------|------|----------|-------|------|----------|-------|------|----------|
| 00:00 | 5.0  | 0.136 41 | 08:00 | 12.3 | 0.290 64 | 16:00 | 10.7 | 0.198 90 |
| 01:00 | 5.6  | 0.147 36 | 09:00 | 14.0 | 0.366 65 | 17:00 | 7.0  | 0.136 41 |
| 02:00 | 6.2  | 0.159 22 | 10:00 | 16.2 | 0.553 10 | 18:00 | 4.0  | 0.147 36 |
| 03:00 | 6.5  | 0.172 06 | 11:00 | 17.8 | 0.819 95 | 19:00 | 3.6  | 0.159 22 |
| 04:00 | 8.2  | 0.185 97 | 12:00 | 19.2 | 0.994 64 | 20:00 | 3.2  | 0.172 06 |
| 05:00 | 8.4  | 0.189 42 | 13:00 | 22.0 | 1.000 00 | 21:00 | 2.7  | 0.185 97 |
| 06:00 | 11.2 | 0.201 01 | 14:00 | 17.0 | 0.677 67 | 22:00 | 2.0  | 0.136 41 |
| 07:00 | 12.3 | 0.252 86 | 15:00 | 13.0 | 0.384 55 | 23:00 | 0.0  | 0.147 36 |

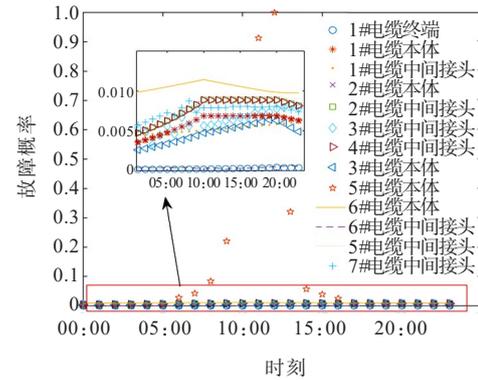
根据图 11,电网运维人员能够清晰地判断出受到水位影响的设备有3#电缆终端设备和5#电缆本体,从而实现线路设备差异化维修。本文通过分析变化趋势,发现两电缆设备故障概率变化趋势与系统相似,但数值不同,原因是经过多设备故障概率耦合的影响,电缆线路系统故障概率处于高水平状态;图 11 中的局部放大部分表明,虽然其他设备处于正常状态,但不同的设备在不同的时间下具有不同的故障概率。

最后,通过对特征变量的数值进行分析,判断出设备故障是水位上涨造成的,提醒电网人员需检查隧道是否发生外破情况,同时将孤立和设备部门的运行环境实时数据传递给调度中心,实现了数据的共享,使得调度部门能够依据电缆线路的安全状态,调整运行方式,避免出现大停电事故。

在现有数据分析下,若只关注设备自身监测数据,则设备被认定为处于健康状态,忽略了目前运行环境实时数据,无法引起电网人员关注。因此,本文综合考虑 2 种数据信息,将研究重点拓展到了设备运行安全,不仅关注设备自身状态,而且将水位的变化情况与设备运行安全状态结合在一起,保证电网的安全。



(a) 电缆部分设备故障概率(一)



(b) 电缆部分设备故障概率(二)

图 11 电缆设备故障概率

Figure 11 Failure probability of cable devices

### 4.3 多变量异常分析

1#电缆本体部分运行数据如表 7 所示。2 种多变量异常分析方案如下。

表 7 1#电缆部分运行数据

Table 7 Partial operation data of 1# cable

| 样本 | 水位/<br>cm | 环境温<br>度/°C | 环境湿<br>度/% | 运行温<br>度/°C | 局放信<br>号/pC | 环流/<br>A | 负荷电<br>流/A | 开关<br>信号 |
|----|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|----------|------------|----------|
| 1  | 4.5       | 27          | 17         | 80          | 50          | 152      | 850        | 1        |
| 2  | 4.7       | 28          | 15         | 82          | 52          | 158      | 848        | 1        |
| 3  | 5.2       | 22          | 19         | 82          | 56          | 162      | 846        | 1        |
| 4  | 5.3       | 26          | 21         | 84          | 55          | 163      | 852        | 1        |
| 5  | 5.4       | 25          | 15         | 84          | 55          | 165      | 853        | 1        |
| 6  | 12.3      | 23          | 16         | 85          | 53          | 162      | 843        | 1        |
| 7  | 16.7      | 24          | 15         | 85          | 53          | 158      | 846        | 1        |
| 8  | 17.6      | 27          | 17         | 86          | 50          | 159      | 847        | 1        |

方案 1:依据文 3.1 分析思路,模型计算分析后,首先通过系统故障概率判断电缆是否出现异常,然后通过比对所有设备故障概率,找到发生异常的设备。

为了简便分析,仅绘制电缆线路系统与异常设备的故障概率曲线变化图,其余设备处在安全状态,不在图形中呈现,如图 12 所示。

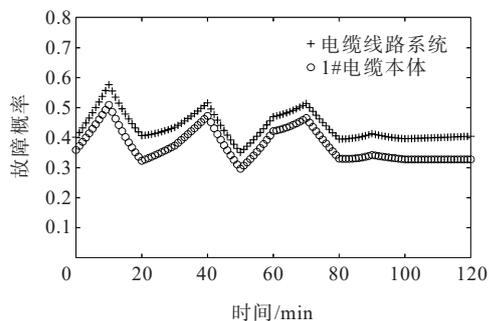


图12 1#电缆本体与电缆系统故障概率

Figure 12 Failure probability of 1# cable and cable system

方案2:采用传统权重确定方式的模糊综合评价进行安全评估,如表8所示。

表8 模糊综合评价

Table 8 Fuzzy comprehensive evaluation

| 温度波动<br>范围/℃ | 温度信息<br>劣化度 | 环流波动<br>范围/A | 环流信息<br>劣化度  | 设备<br>劣化度     | 系统综合<br>评价等级 |
|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| [80,88]      | [0.5,0.9]   | [152,161]    | [0.578,0.74] | [0.216,0.328] | 优秀           |

2种方案对比可知,方案1采用综合评价法,存在2种不足:其一,权重确定不合理,未考虑变量之间的耦合作用,淹没了部分重要信息,进而得出了错误的结论;其二,在由设备评价整个电缆系统时,随着系统的复杂性提高,设备数量增加,该方法缺陷更为明显。本系统涉及设备多达21个,分配到每个设备的权重微乎其微,某一个设备的异常行为,在此方法下将被忽略,线路被认定为仍处于安全状态,故该方法仅适用于复杂性低的线路。

图12中,异常信息的共同作用使得设备故障概率处于较高水平。2个曲线变化趋势相同,但数值存在差异,原因是系统的故障概率是由所有设备共同影响得到的,且起关键影响的是异常设备即1#电缆本体;电缆系统与1#电缆本体的故障概率在0.5附近波动,此时设备处于故障临界状态,因此电网运维人员应立即安排人员前去检修,避免设备故障,从而严重影响电缆线路安全运行的情况发生,调度人员应提前做好调整运行方式的准备,避免故障发生后,出现更加恶劣的大范围停电事故。

## 5 结语

利用系统动力学方法,综合考虑电网中电气信号、设备状态参数和运行环境参数搭建电缆线路全信息化安全评估模型,实现对电缆线路系统的运行安全评估。以某地区电缆线路为例对本文所提模型的安全性评估进行验证,得出以下结果。

1) 本文方法能够依据现有数据变化,直接反映设备故障概率的变化,实现了运行数据与设备状态变化过程的动态量化。

2) 本文方法弥补了模糊综合评价法指标之间相互独立的缺陷,将设备之间的状态联系在一起,考虑了多变量之间的耦合影响;体现了对复杂电缆线路系统化分析处理的优势,通过分析不同功能层或层级结构的关联,实现快速判断故障、快速定位故障和快速识别故障3层评估预警功能,极大提高了电缆线路的安全性。

3) 本文以系统动力学方法为载体,建立了任一电缆设备的特征变量与整个电缆线路系统的关系,解决了部分在线监测装置数据孤岛问题,实现了设备部门与调度部门之间的数据共享,并且将研究重点延伸到了设备运行安全,实现了由设备单一健康状态评估和单一电气信号评估到二者与运行环境协同分析的拓展。

## 参考文献:

- [1] 饶显杰,徐忠林,刘翔宇,等.基于反射系数与核函数构建的新型电缆缺陷诊断方法[J].电工技术学报,2024,39(7):2184-2192+2213.  
RAO Xianjie, XU Zhonglin, LIU Xiangyu, et al. A new cable defect diagnosis method based on reflection coefficient and kernel function construction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7):2184-2192+2213.
- [2] 魏文青,淡淑恒.基于有限元和神经网络的电缆输送新能源极限能力评估[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):191-200.  
WEI Wenqing, DAN Shuheng. Evaluation of ultimate capacity of cable transmission new energy based on finite element and neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1):191-200.
- [3] 张育梁,夏向阳,夏君山,等.基于Bagging-异质k近邻的输电电缆故障诊断方法[J].高压电器,2023,59(5):104-112+121.  
ZHANG Yuliang, XIA Xiangyang, XIA Junshan, et al. Fault diagnosis method for transmission cables based on bagging-heterogeneous k-nearest neighbor[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5):104-112+121.
- [4] 王志武,涂画,李力行,等.基于时频域反射法的核电站仪控电缆缺陷检测[J].电力工程技术,2023,42(5):240-249.  
WANG Zhiwu, TU Hua, LI Lixing, et al. Defect detection of I & C cable in NPP based on TFDR[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5):240-249.
- [5] 王晓卫,王雪,王毅钊,等.基于图像信息熵与多元变分

- 模态分解的电缆局放信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2024,39(13):4100-4115+4152.
- WANG Xiaowei, WANG Xue, WANG Yizhao, et al. A denoising algorithm for cable partial discharge signals based on image information entropy and multivariate variational mode decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024,39(13):4100-4115+4152.
- [6] 刘炎,夏向阳,李明德,等. 高压电力电缆轨迹法在线监测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019,34(3):202-210.
- LIU Yan, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Research on online monitoring system based on locus method of HV power cable[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(3):202-210.
- [7] 刘永莉,熊豪文,肖衡林,等. 基于有限元的综合管廊电缆温度场分布研究[J]. 电力科学与技术学报, 2022,37(6):82-90.
- LIU Yongli, XIONG Haowen, XIAO Henglin, et al. Study on temperature field distribution of pipe gallery cable based on finite element method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(6):82-90.
- [8] WANG W W, YAN X L, LI S T, et al. Failure of submarine cables used in high-voltage power transmission: characteristics, mechanisms, key issues and prospects[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021,15(9):1387-1402.
- [9] 袁婧,周承科,周文俊,等. 基于时间延迟理论的高压电缆巡检周期优化[J]. 高电压技术, 2021,47(5):1640-1648.
- YUAN Jing, ZHOU Chengke, ZHOU Wenjun, et al. Maintenance scheduling for HV cable based on the delay-time concept[J]. High Voltage Engineering, 2021,47(5):1640-1648.
- [10] 胡思洋,杨健维,廖凯,等. 计及大规模电动汽车接入的配电网故障分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(16):33-46.
- HU Siyang, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Fault analysis method for an urban distribution network considering large-scale electric vehicle access[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(16):33-46.
- [11] 魏勇,崔俊彬,刘辛彤,等. 基于改进动态故障树的电力系统广域保护通信系统可靠性分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(23):171-177.
- WEI Yong, CUI Junbin, LIU Xintong, et al. A reliability analysis method power system wide area protection communication system based on an improved dynamic fault tree[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(23):171-177.
- [12] 王文焕,郭鹏,祝洁,等. 基于故障树及贝叶斯网络的继电保护系统风险评估及故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021,36(4):81-90.
- WANG Wenhuan, GUO Peng, ZHU Jie, et al. Fault positioning and risk assessment method of relay protection based on fault tree and Bayesian network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021,36(4):81-90.
- [13] 杨威,蒲彩霞,杨坤,等. 基于CNN-GRU组合神经网络的变压器短期故障预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(6):107-116.
- YANG Wei, PU Caixia, YANG Kun, et al. Short-term fault prediction method for a transformer based on a CNN-GRU combined neural network[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(6):107-116.
- [14] 段双明,徐超. 基于改进残差网络的锂离子电池故障诊断[J]. 电池, 2023,53(3):257-261.
- DUAN Shuangming, XU Chao. Fault diagnosis of Li-ion battery based on improved residual network[J]. Battery Bimonthly, 2023,53(3):257-261.
- [15] ZHANG X Y, HE H F. Condition evaluation of storage equipment based on improved D-S evidence theory[J]. MATEC Web of Conferences, 2017,95:14007.
- [16] LIN S S, LI C B, XU F Q, et al. The strategy research on electrical equipment condition-based maintenance based on cloud model and grey D-S evidence theory[J]. Intelligent Decision Technologies, 2018,12(3):283-292.
- [17] 陈皓勇,蔡伟钧,陈健润. 能量与信息融合的电力物联网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(22):8-17.
- CHEN Haoyong, CAI Weijun, CHEN Jianrun. Power Internet of Things technology with energy and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(22):8-17.
- [18] 王玉伟,余俊龙,彭平,等. 基于多模型融合的变压器故障在线检测方法[J]. 高电压技术, 2023,49(8):3415-3424.
- WANG Yuwei, YU Junlong, PENG Ping, et al. Online detection method for transformer faults based on multi-model fusion[J]. High Voltage Engineering, 2023,49(8):3415-3424.
- [19] 邹阳,俞豪奕,金涛. 融合模糊K近邻及证据理论的变压器油纸绝缘状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023,51(14):55-63.
- ZOU Yang, YU Haoyi, JIN Tao. Evaluation method of the oil-paper insulation condition of a transformer based on fuzzy K nearest neighbor and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(14):55-63.
- [20] 李明节,刘宇,舒治淮,等. 中国变电站二次系统技术发展趋势分析[J]. 电网技术, 2024,48(1):1-12.
- LI Mingjie, LIU Yu, SHU Zhihuai, et al. Development trend of secondary system technology in China's substations[J]. Power System Technology, 2024,48(1):1-12.
- [21] 钱小毅,孙天贺,姜兴宇,等. 基于动态邻域指标重构的风电机组故障检测方法[J]. 太阳能学报, 2024,45(9):557-563.
- QIAN Xiaoyi, SUN Tianhe, JIANG Xingyu, et al. Wind turbine fault detection method based on dynamic neighborhood index reconstruction[J]. Acta Energetica

- Solaris Sinica,2024,45(9):557-563.
- [22] 郝如海,智勇,祁莹,等.基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):73-78.  
HAO Ruhai, ZHI Yong, QI Ying, et al. Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable energy penetration power grid at sending end[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 73-78.
- [23] 石宜金,谭贵生,赵波,等.基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(21):167-176.  
SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 167-176.
- [24] 黄新波,吴明松,朱永灿,等.基于模糊数学的电缆线路风险评估模型研究[J].高压电器,2021,57(9):19-25.  
HUANG Xinbo, WU Mingsong, ZHU Yongcan, et al. Research on risk assessment model of cable line based on fuzzy mathematics[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 19-25.
- [25] 李平,洪思远,李海锋. XLPE 电力电缆健康度的模糊灰色综合评价方法[J].机电工程技术,2012,41(1):20-24.  
LI Ping, HONG Siyuan, LI Haifeng. Study of XLPE power cables health state evaluation based on fuzzy grey theory[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012, 41(1): 20-24.
- [26] 李家豪,王青于,范玥霖,等.鲸鱼优化算法-双向长短期记忆神经网络用于断路器机械剩余寿命的预测研究[J].高电压技术,2024,50(1):250-262.  
LI Jiahao, WANG Qingyu, FAN Yuelin, et al. Research on whale optimization algorithm-bidirectional long-short-term memory neural network for prediction of machinery remaining useful life of circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 250-262.
- [27] 林翔,方健,王红斌,等.基于重要参量和参数修正的配电网设备故障率计算方法[J].电测与仪表,2022,59(2):141-147.  
LIN Xiang, FANG Jian, WANG Hongbin, et al. Calculation method of equipment failure rate in distribution network based on important parameters and parameter correction [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2022, 59(2): 141-147.
- [28] 刘泽扬,荆朝霞,孙启星,等.基于系统动力学的发电容量充裕度机制分析[J].电力系统自动化,2022,46(14):109-118.  
LIU Zeyang, JING Zhaoxia, SUN Qixing, et al. Analysis on generation capacity adequacy mechanism based on system dynamics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 109-118.
- [29] 彭生江,杨淑霞,袁铁江.面向风煤富集区域的风-氢-煤耦合系统演化发展系统动力学[J].高电压技术,2023,49(8):3478-3489.  
PENG Shengjiang, YANG Shuxia, YUAN Tiejia. System dynamics of the evolutionary development of coupled wind-hydrogen-coal system for wind-coal enriched areas[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3478-3489.
- [30] 孙黎霞,王中一,戴洪,等.计及网络结构的配电网健康状态评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(4):64-74.  
SUN Lixia, WANG Zhongyi, DAI Hong, et al. The health state assessment method of a smart distribution network considering network structure[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 64-74.
- [31] 杨春波,陶青,张健,等.基于综合健康指数的设备状态评估[J].电力系统保护与控制,2019,47(10):104-109.  
YANG Chunbo, TAO Qing, ZHANG Jian, et al. Equipment status evaluation based on comprehensive health index[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 104-109.
- [32] MA Z, SHANG Y W, YUAN H W, et al. Holistic performance evaluation framework: power distribution network health index[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(9): 2184-2193.
- [33] HUGHES D. Condition based risk management (CBRM) – enabling asset condition information to be central to corporate decision making[C]//18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005). Turin, Italy, 2005.
- [34] 李二霞,亢超群,李玉凌,等.基于设备状态评价和电网损失风险的配电网检修计划优化模型[J].高电压技术,2018,44(11):3751-3759.  
LI Erxia, KANG Chaoqun, LI Yuling, et al. Optimization model of distribution network maintenance plan based on equipment condition evaluation and grid loss risk[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3751-3759.
- [35] 顾佳浩,淡淑恒.考虑HI理论和在线监测误差的配电网可靠性评估[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(4):127-134.  
GU Jiahao, DAN Shuheng. Reliability evaluation on distribution network considering HI theory and online monitoring error[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2021, 33(4): 127-134.
- [36] 甘国晓,耿光超,高波,等.考虑线路停运概率的电力系统连锁故障阻断控制[J].电网技术,2020,44(1):266-272.  
GAN Guoxiao, GENG Guangchao, GAO Bo, et al. Blocking control of power system cascading failures considering line outages probability[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 266-272.
- [37] 罗涌恒,姜飞,苏斌,等.基于设备安全边界的分布式能源站实时安全风险评估及应对策略[J].电网技术,2024,48(8):3307-3316.  
LUO Yongheng, JIANG Fei, SU Bin, et al. Real-time security risk assessment and response strategy for distributed energy stations based on equipment security boundary[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3307-3316.

- and transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2023,47(4):1323-1331.
- [21] 周莹坤,谢恒,孙华东,等. 新能源机组低电压穿越控制参数对机端工频过电压的影响[J]. 电网技术,2022,46(5):1907-1916.  
ZHOU Yingkun, XIE Heng, SUN Huadong, et al. Influence of renewable energy low voltage ride-through control parameters on overvoltage[J]. Power System Technology,2022,46(5):1907-1916.
- [22] 屠竞哲,张健,刘明松,等. 考虑风机动态特性的大扰动暂态过电压机理分析[J]. 电力系统自动化,2020,44(11):197-205.  
TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Mechanism analysis of transient overvoltage with large disturbance considering dynamic characteristics of wind generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(11):197-205.
- [23] GARNICA LÓPEZ M A, GARCÍA DE VICUÑA J L, MIRET J, et al. Control strategy for grid-connected three-phase inverters during voltage sags to meet grid codes and to maximize power delivery capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9360-9374.
- [24] YUAN H, XIN H H, HUANG L B, et al. Stability analysis and enhancement of type-4 wind turbines connected to very weak grids under severe voltage sags[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019,34(2):838-848.
- [25] 裴金鑫. 电网短路故障下风电并网系统的暂态稳定性分析及控制技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.  
PEI Jinxin. Transient stability analysis and enhanced control strategy research of grid-connected wind power generation under grid faults[D]. Chongqing: Chongqing University,2021.
- [26] TANG W, HU J B, CHANG Y Z, et al. Modeling of DFIG-based wind turbine for power system transient response analysis in rotor speed control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6795-6805.
- [27] 刘洋,王聪颖,夏德明,等. 电网故障导致大面积风电低电压穿越对电网频率的影响分析及措施[J]. 电网技术, 2021,45(9):3505-3514.  
LIU Yang, WANG Congying, XIA Deming, et al. Influence of large area wind power low voltage ride-through on power grid frequency caused by power grid faults[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3505-3514.
- 
- (上接第112页 Continued from page 112)
- [38] 张立石,梁得亮,刘桦,等. 基于小波变换与逻辑斯蒂回归的混合式配电变压器故障辨识[J]. 电工技术学报, 2021,36(增刊2):467-476.  
ZHANG Lishi, LIANG Deliang, LIU Hua, et al. Fault identification of hybrid distribution transformer based on wavelet transform and logistic regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(Sup 2):467-476.
- [39] 陈彬,于继来. 强台风环境下配电线路故障概率评估方法[J]. 中国电力,2019,52(5):89-95.  
CHEN Bin, YU Jilai. Outage probability evaluation of the distribution corridors under strong typhoon environment [J]. Electric Power,2019,52(5):89-95.
- [40] 谢敬东,陆池鑫,鲁思薇,等. 基于序关系-熵权法的电力市场风险评估[J]. 中国电力,2021,54(6):71-78.  
XIE Jingdong, LU Chixin, LU Siwei, et al. Electricity market risk evaluation based on order relation-entropy weight method[J]. Electric Power,2021,54(6):71-78.
- [41] 王孟雅,陈震,潘尔顺. 基于马尔科夫决策的冷贮备串联系统状态维修与备件联合优化[J]. 工业工程与管理, 2022,27(6):14-23.  
WANG Mengya, CHEN Zhen, PAN Ershun. Joint optimization of condition-based maintenance and spare parts for cold standby series system considering Markov decision[J]. Industrial Engineering and Management, 2022,27(6):14-23.
- [42] 徐涛,李明贞,刘毅刚,等. 基于韦布尔分布的无失效数据参数估计的高压电缆寿命评估[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(2):233-238.  
XU Tao, LI Mingzhen, LIU Yigang, et al. High-voltage cable life assessment based on zero-failure data parameter estimation of Weibull distribution[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(2): 233-238.